

■7群 (コンピュータソフトウェア) - 7編 (分散協調とエージェント)

3章 エージェント理論/協調モデル

【本章の構成】

本章では以下について解説する.

- 3-1 信念管理
- 3-2 市場の理論とエージェント
- 3-3 ゲーム理論とエージェント
- 3-4 メカニズムデザイン
- 3-5 分散協調問題解決
- 3-6 結果共有とタスク共有
- 3-7 分散制約充足
- 3-8 FA/C
- 3-9 交渉
- 3-10 契約ネットプロトコル
- 3-11 市場指向メカニズム
- 3-12 仲介 (メディエーション)
- 3-13 計算組織論

■7 群-7 編-3 章

3-1 信念管理

■7群-7編-3章

3-2 市場の理論とエージェント

■7 群-7 編-3 章

3-3 ゲーム理論とエージェント

(執筆: 生天目 章) [2010年9月 受領]

複数エージェントの動作上の整合性を図ることで全体の効率性を高めることは、分散協調の基本問題である。資源や時間の希少性という制約のもと、個々のエージェントが自らの利益を追求するならば、競争は避けられない。そのとき、適切なルールのもとで競争が行われるならば、無意味な争いがゲームになる。また、競争がどのような状態で決着するかは、ゲームの結果にまかせればよいことになる。

お互いの行為が相互に依存するとき、お互いに自らの行為を規定できなくなる、いわば両すくみの状態を解消する概念がゲームの解である。それは、相手がその行為を変えようとしないうりにおいて自分にも最適な一組の行為として定義される。このようなゲームの解の概念が共有されると、お互いに相手がとる行為を予測でき、両すくみ状態は解消される。

不特定多数のエージェント間の相互依存関係を扱うのが、社会ゲームである。このような状況のとき、個々のエージェントの利得は他エージェントの行為に依存して決まる。社会ゲームには、同じ行為のエージェントが増すことで利得が高まる集中化、逆にエージェントが分散されるとき利得が高まる分散化の問題がある。個々のエージェントの選択と全体の選択の間に正または負のフィードバックループが働き、集中と分散の問題がうまく解決できることを示す。

最初にエージェントの集中化の問題を取り上げる。個々のエージェントは、次の2つの選択肢を持つ。

S_1 : 新方式を採用する。

S_2 : 旧方式を継続する。

それぞれの選択肢のもとでの各エージェントの利得を次式で与える。

$$U_i(S_1) = ap - c, \quad U_i(S_2) = 0 \quad (3 \cdot 1)$$

新方式を採用するエージェントの便益は新方式を採用するエージェントの割合 (p) に比例して増し、また新方式の採用にはコスト c を伴う。一方で、旧方式を継続するとき便益とコストはゼロである。各エージェントは利得の大きい方を選ぶとして以下のルールが求まる。

(i) $p > \theta (= c/a)$ ならば、新方式を採用

(ii) $p < \theta$ ならば、旧方式を維持 (3 · 2)

p が増すと新方式を採用するエージェントは更に増すという、個人と全体の選択の間には正のフィードバックが働く。このとき、全員新方式を採用する、あるいは全員旧方式を維持する状態が、ゲームの解になる。どちらの解に落ち着くかは、最初に新方式を採用するエージェントの割合と便益とコストの比 $c/a = \theta$ によって決まる。また $a > c$ ならば、全員新方式を採用することが最も望ましい。そして、個々のエージェントの合理的な選択に任せておけば、多くの場合、全体に最適な解が得られることになる。

次に、分散化の問題を取り上げる。図 3·1 に示す2つの地点を結ぶルート A と B があり、目的地までの所要時間はルートによって異なる。そのことで、多くのエージェントが所要時間

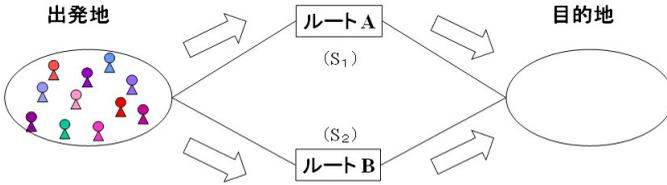


図 3・1 ルート選択問題

が短い方のルートを選択するならば混雑が生じ、所要時間は大幅に増加する。

各ルートを選択するエージェントの利得関数を次式で与える。

$$U(S_1) = a(1 - p), \quad U(S_2) = bp \quad (3 \cdot 3)$$

a は、ルート A を選択したときの便益、 b はルート B を選択したときの便益、 p はルート A を選択するエージェントの割合を表す。各エージェントのルート選択上の分岐点は、両ルートのもとでの利得が同じになるようにエージェントが分散しているときであり、分岐点となる割合は次式を解くことで求まる。

$$a(1 - p) = bp \quad (3 \cdot 4)$$

各エージェントにとって合理的な選択は、ルート A を選択するエージェントの割合 p と便益の比 $a/(a + b) \equiv \theta$ の関係から、次式で求まる。

- (i) $p < \theta$ ならば、ルート A (S_1) を選択
 - (ii) $p > \theta$ ならば、ルート B (S_2) を選択
- (3・5)

ルート A を選択するエージェントの割合 p が θ よりも少ないとき、ルート A を選択するエージェントは増えるので、個人と全体の選択の間には負のフィードバックが働く。このとき、ゲームの解は、ルート A とルート B を選択するエージェントの割合が $p = \theta$ と $1 - p = 1 - \theta$ になるときである。

すべてのエージェントの利得の総和を最大（または平均所要時間の最小化）にするのが、全体の最適解である。ゲームの解は、個々のエージェントが自らの最適性を追求するときの落ち着き先であるが、個と全体の選択の間に負のフィードバックが働くときは、ゲームの解が全体の最適解になるとは限らない。ルート A を選択するエージェントの割合が p のとき、1 人当たりの平均利得は次式で求まる。

$$E(p) = pU(S_1) + (1 - p)U(S_2) = (a + b)p(1 - p) \quad (3 \cdot 6)$$

式(3・6)は、 $p = 0.5$ のとき最大値をとり全体の最適解になる。ルート A と B の間に便益に差異があり、 $a \neq b$ のときはゲームの解と全体の最適解は異なる。式(3・4)より、ゲームの解のもとでは全員の利得は等しくなるが、全体の最適解のもとでは選択するルートによってエージェントの利得は異なり、不等重という問題に直面することになる。

社会ゲームは、エージェント間の相互依存関係が大きなスケールで現れ、大多数のエージェントの利益につながる相互協力の場を扱う。このような場において、個々のエージェントのミ

クロ行為は、全体の巨視的な状態に連結され、そのようなマクロな状態の推移によって個々のミクロの行為が決まるというマイクロ・マクロリンクが存在することで、個々のエージェントの自発的な行為によって集中化と分散化の問題は解決できる。しかしながら、相互協力がもたらす効果（余剰利得）をエージェントの間でどのように分配すべきか、という問題が生じる。それは、誰もがより多くの分け前を望むからである。このような利得分配の問題も、ゲーム理論の範疇に入る。

■参考文献

- 1) 生天目章：“ゲーム理論と進化ダイナミクス,” 森北出版, 2003.
- 2) J. Rosenschein and G. Zlotkin：“Rules of Encounter: Designing Convention for Automated among Computers,” The MIT Press, 1994.

■7群-7編-3章

3-4 メカニズムデザイン

(執筆者：横尾 真) [2010年9月 受領]

メカニズムデザインとは、一言で言えば、複数の人間/エージェントが何らかの社会的決定をする場合に、ある望ましい結果をもたらすような相互作用のルールを設計することである。

例えば、国が国有財産をオークション/入札によって売却するといった状況を考えよう。どのような結果が望ましいかに関しては様々な議論があるところだが、一つの可能性として、その財の価値を最も高く評価し、活用して使えるような個人（もしくは法人）に財が売却されることが考えられる。各参加者の持つ評価値があらかじめ分かっているならば、上記の目標を達成することは簡単であるが、実際には評価値は個人情報であり、各個人に評価値を申告させても、真の評価値を申告するか否かは、各参加者の自由意思に任されている。

このような、メカニズムのデザイナー（オークション/入札の主催者）が直接知ることのできない個人情報が存在すること、すなわち、各参加者がどのようなタイプであるかに関する情報を直接得ることができないことが、メカニズムデザインが困難であることの原因となっている。メカニズムデザインはミクロ経済学・ゲーム理論の一分野として研究が行われており、近年、人工知能/エージェントの分野でも活発な研究が行われている。

通常の入札（第一価格秘密入札と呼ばれる）では、各参加者は、自分が支払っても良い金額を、他者の入札値を知らされずに入札し、最も高い金額を入札した入札者が落札して、自分の入札額を支払う。通常の入札では、各参加者は、勝てる範囲でなるべく入札額を下げようとする誘因があるため、最も高い評価値を持っている入札者が必ず財を得ることは保証できない。

一方、上記の入札方法をわずかに変更することにより、すべての参加者が合理的に（自分の利益を最大化するように）振る舞うという仮定のもとで、最も評価値が大きい参加者が必ず財を落札することを保証することができる。この方法は第二価格秘密入札、もしくは Vickrey オークションと呼ばれ²⁾、最も高い金額を入札した入札者が落札することは第一価格秘密入札と同様であるが、支払額は自分の入札額ではなく、二番目に高い入札額となる。第二価格秘密入札を用いた場合、各参加者にとって、自分の真の評価値を入札することが、他者の行動に関わらず、自分の利益を最大化する最適な方法（支配戦略）となっている。実際、支払額は自分の入札額とは無関係に決定されるため、真の評価値より低い金額を入札することは、落札して利益がある場合に、勝つ可能性を減らすだけで意味がない。

社会的決定に関する望ましい性質として、社会的決定の結果、得られる状態がパレート効率的であることがある。パレート効率的な状態とは、いずれかの参加者の効用を犠牲にすることなしには、ほかのプレイヤーの効用を向上することができない状態を意味する。参加者の効用が任意の形式を取り得る場合には、すべての場合においてパレート効率性を実現できるメカニズムの設計は困難であり、Gibbard-Satterthwaite の一般可能性定理により、そのようなメカニズムの設計は、常にある一個人の効用を最大化するといったトリビアルなものを除いて不可能であることが示されている。

■参考文献

- 1) A. Mas-Colell, M.D. Whinston, and J.R. Green : “Microeconomic Theory,” Oxford University Press, 1995.
- 2) W. Vickrey : “Counterspeculation, auctions, and competitive sealed tenders,” Journal of Finance, 16:8-37, 1961.

■7群-7編-3章

3-5 分散協調問題解決

(執筆著者：北村泰彦) [2011年3月 受領]

分散協調問題解決 (Cooperative Distributed Problem Solving) は、エージェントとも呼ばれる問題解決器の疎結合ネットワークが、個別の能力を超えた問題を解決するためにどのように協力するかを研究する^{2),3)}。各エージェントは高度な問題解決が可能で、独立して動作することができるが、単一のエージェントだけでは問題を解決するための十分な知識、資源、情報を持っていないので、協力が必要となる。

分散協調問題解決はマルチエージェントによる問題解決であるが、エージェントは博愛性 (Benevolence) を有することを前提としている。すなわち、エージェント間には共通の目標があり、それを協力して達成しようとする。これはすべてのエージェントがある個人または組織によって設計または運用されている際に成り立つ前提である。近年のマルチエージェントの研究ではそれを前提としていない利己的 (Self-interested) なエージェントを扱う場合も多い。

分散協調問題ではエージェントはコンピュータネットワークによる疎結合が前提とされており、並列計算機を用いて問題解決における並列性を研究する並列問題解決 (Parallel Problem Solving) とは異なっている。また、分散データベースのような従来の分散処理システムとも異なっている。分散処理システムは複数の処理ノードから構成されているが、あたかも一つの仮想的なノードで処理されたかのように見せる透明性 (Transparency) が重要であるが、分散協調問題解決ではエージェントの分散は明示的である。

分散協調問題解決の過程は一般的に、問題の分割と割り当て、副問題の解決、解の統合の3つの段階より成り立っている¹⁾。特に、問題の分割と割り当ての過程が中心となる問題解決手法はタスク共有 (Task Sharing)、解統合の過程が中心となる問題解決手法は結果共有 (Result Sharing) と呼ばれている。副問題の解決において、分散したエージェントは相互作用を行いながら、自律的に部分的な問題解決を進める。ここで、正しい全体解が効率的に導き出されるように、エージェント間での調整 (Coordination) や振る舞いの計画 (Planning) に関する技術の開発が重要な研究要素となる。

エージェント間で調整を行う分散アルゴリズムとしては分散制約充足 (Distributed Truth Maintenance) が代表的である⁴⁾。これは制約充足問題を複数のエージェントに分散化させ、エージェント間の調整により充足解を導き出すように定式化を行っている。また、マルチエージェント真理値維持 (Multiagent Truth Maintenance)⁵⁾ や多段階交渉 (Multistage Negotiation)⁶⁾ もエージェント間に存在する矛盾する情報をメッセージのやり取りにより解消する手法である。

また、プランニング技術を用いてエージェント間の振る舞いの調整を行う手法もある⁷⁾。これには、(1) すべてのエージェントのプランを一つのエージェントが集中的に立案するもの⁸⁾、(2) それぞれのエージェントで立案した個別プランを一つのエージェントがとりまとめ調整するもの⁹⁾、(3) それぞれのエージェントが個別プランを立案し、メッセージのやり取りにより調整するもの¹⁰⁾、などに分類される。

■参考文献

- 1) R.G. Smith and R. Davis: "Frameworks for Cooperation in Distributed Problem Solving," IEEE SMC, vol.11, no.1, pp.61-70, 1981.

- 2) E.H. Durfee, V.R. Lesser, and D.D. Corkill : "Trends in Distributed Problem Solving," IEEE TKDE, vol.1, no.1, pp.63-83, 1989.
- 3) E.H. Durfee, V.R. Lesser, and D.D. Corkill : "Distributed Problem Solving," in Encyclopedia of Artificial Intelligence, ed. S.C. Shapiro, pp.379-388, Wiley, 1995.
- 4) M. Yokoo, E.H. Durfee, T. Ishida, and K. Kuwabara : "The Distributed Constraint Satisfaction Problem: Formalization and Algorithms," IEEE TKDE, vol.10, no.5, pp.673-685, 1998.
- 5) M.N. Huhns and D.M. Bridgland : "Multiagent Truth Maintenance," IEEE SMC, vol.21, no.6, pp.1437-1445, 1991.
- 6) S.E. Conry, K. Kuwabara, V.R. Lesser, and R.A. Meyer : "Multistage Negotiation for Distributed Satisfaction," IEEE SMC, vol.21, no.6, pp.1462-1477, 1991.
- 7) E.H. Durfee : "Distributed Problem Solving and Planning," in Multiagent Systems, ed. G.Weiss, pp.121-164, MIT Press, 1999.
- 8) K. Konolige and N.J. Nilsson : "Multiple-agent planning systems," Proc. AAA I80, pp.138-142, 1980.
- 9) M. Georgeff : "Communication and Interaction in Multi-agent Planning," Proc. AAAI 83, pp.125-129, 1980.
- 10) E.H. Durfee and V.R. Lesser : "Partial Global Planning: A Coordination Framework for Distributed Hypothesis Formation," IEEE SMC, vol.21, no.5, pp.1167-1183, 1991.

■7 群-7 編-3 章

3-6 結果共有とタスク共有

(執筆著者：北村泰彦) [2011年3月 受領]

3-6-1 分散協調問題解決の過程

分散協調問題解決の過程は、図 6・1 に示すように、問題の分割と割り当て (Stage 1)、副問題の解決 (Stage 2)、解の統合 (Stage 3) の 3 つの段階より成り立っている。

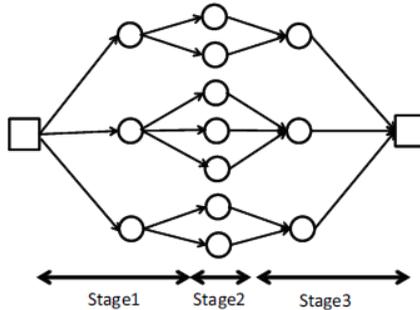


図 6・1 分散協調問題解決の手順

(1) 問題の分割と割り当て

問題を分割して解決する手法は分割統治法のように従来からの問題解決手法にも見られるものである。しかしながら、従来の問題解決では問題やシステムの能力が固定的である静的な環境を前提としていたのに対し、分散協調問題解決ではそれらが変化するような動的な環境を前提としている。すなわち、どのような問題がいつ与えられるかあらかじめ分からない、割り当てた副問題の実行時間が正確に推測できない、突然の故障などにより問題解決に関わるエージェントの種類や数に変化が生じるかもしれない、といった状況にも対処しなければならない。したがって、分散協調問題解決ではあらかじめ最適な問題の分割や割り当てを求めるといったような手法よりも、エージェントの状況やそのおかれている環境の変化に応じて動的に問題の分割や割り当てを行う手法が有用になる。

(2) 副問題の解決

もし問題が独立な副問題に分割されておれば、副問題を割り当てられたエージェントは単にその解決に専念すればよい。しかしながら、分割された副問題間に何らかの制約関係が残されている場合には、それらを調整しながら解決をしていく必要がある。ここでは、副問題解決の際のエージェント間での調整機構が重要になる。

(3) 解の統合

問題が独立な副問題に分割されておれば、その解は部分解を組み合わせただけの単純なものになる。しかしながら、問題の分割がエージェント間で重複を含んだり、副問題の解決に利用されるデータに曖昧さを含んだりするような場合には、それぞれのエージェントにおいて、冗長であったり不正確であったりするような部分解が得られる場合がある。そのような場合には、

部分分解の選択や統合を適切に行う機構が重要になる。

3-6-2 タスク共有と結果共有

あらゆる分散協調問題解決が必ずしも3つの段階を経るとは限らない。特に問題の分割と割り当ての過程が中心となる問題解決手法は、タスク共有 (Task Sharing) 手法、解統合の過程が中心となる問題解決手法は結果共有 (Result Sharing) 手法と呼ばれている。

(1) タスク共有

タスク共有手法が有効な代表的な問題事例は、複数の工作機械とそれを管理するエージェントから成る製造工場におけるタスク割り当て問題である。与えられたタスクを適切にサブタスク (副問題) に分割し、そのサブタスクを工作機械を担当する各エージェントに適切に割り当て、各エージェント間でスケジュールの調整が終われば、実行した結果がそのまま全体解となる。このような問題における不確実性は、どのような規模のタスクがいつ発生するか自明でない、エージェントはいつ故障するか分からない、といった点が挙げられる。したがって、不定期に発生する様々なタスクを如何に適切なエージェントに割り当てることが重要になる。このような問題に対処する手法としては契約ネットプロトコル²⁾に代表されるような交渉やオークションの技法を応用することができる。

(2) 結果共有

結果共有手法が有効な代表的な問題事例はセンサネットワークである。センサネットワークでは、地理的に分散したセンサとそれを管理するエージェントから構成され、その情報をもとに航空機の進路予測を行う。分散して存在するエージェントはセンサからの情報を統合して、全体的な解釈 (解) を導き出す。このような問題では、航空機の進路をあらかじめ決定することはできないので、問題を分割することは意味がない。むしろ、各エージェントがそれぞれのセンサから得られる、雑音を含み、冗長で大量のデータを如何に協調的に処理するかということが重要になる。このような問題に対処する手法としては、分散型黒板モデルに基づく FA/C 法³⁾ や PGP 法⁴⁾ などが挙げられる。

■参考文献

- 1) R.G.Smith and R.Davis : "Frameworks for Cooperation in Distributed Problem Solving," IEEE SMC, vol.11, no.1, pp.61-70, 1981.
- 2) R.G.Smith : "The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver," IEEE Trans. Comput., vol.29, no.12, pp.1104-1113, 1980.
- 3) V.R.Lesser and D.D.Corkill : "Functionally Accurate, Cooperative Distributed Systems," IEEE SMC, vol.11, no.1, pp.81-96, 1981.
- 4) E.H.Durfee and V.R.Lesser : "Partial Global Planning: A Coordination Framework for Distributed Hypothesis Formation," IEEE SMC, vol.21, no.6, pp.1167-1183, 1991.

■7 群-7 編-3 章

3-7 分散制約充足

(執筆者：平山勝敏) [2010年11月 受領]

分散制約充足問題とは、制約充足問題における変数や制約が複数のエージェントに分散された問題である。本節では、分散制約充足問題の定義と代表的な解法を概観する。

3-7-1 分散制約充足問題

制約充足問題 (Constraint Satisfaction Problem : CSP)¹⁾とは、離散的な値をとる複数の変数とそれらの間に存在する複数の制約に対して、すべての制約を満たすように変数の値を決める問題である。この問題は、真偽値維持、線画解釈、プランニングやスケジューリングなど人工知能に関する様々な問題を定式化できるため、1970年代から主に人工知能の分野で研究が進められてきた。CSPの問題例は三つ組 (X, D, C) で表され、 $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ は変数集合、 $D = \{D_1, \dots, D_n\}$ は各変数に対する値域集合、 $C = \{C_1, \dots, C_m\}$ は制約集合を表す。変数 x_i は、それに対応する値域 D_i より値 d_i をとるが、とることができる値は制約集合 C により制限されている。制約 C_j とは、変数のある部分集合 S_j 上で定義された関係 (relation) であり、一般に、 S_j に含まれる変数群が同時にとることができる値の組合せを表す。なお、 S_j を制約 C_j のスコープと呼ぶ。問題例 (X, D, C) の解とは、制約集合 C のすべての制約を満たすような変数集合 X への値の割当てである。

一方、分散制約充足問題 (Distributed Constraint Satisfaction Problem : DisCSP)³⁾は、CSPにおける変数や制約が複数のエージェントに分散された問題である。複数のエージェントが協力して系全体の一つの目標を達成する分散協調問題解決の幾つかの応用問題 (例えば、分散真偽値維持、分散解釈、分散資源配分など) は DisCSP として定式化できる。DisCSPの問題例は、CSPの問題例 (X, D, C) に、エージェントの集合である $A = \{a_1, \dots, a_l\}$ 、及び、変数集合 X からエージェント集合 A への写像 M を加えた 5 つ組 (X, D, C, A, M) で表される。写像 M は X の各変数がどのエージェントに属するかを指定する。なお、スコープ内のすべての変数がある 1 エージェントに属する制約をエージェント内制約、それ以外の制約をエージェント間制約と呼ぶ。DisCSPの問題例 (X, D, C, A, M) の解とは、CSPの場合と同様、制約集合 C のすべての制約を満たすような変数集合 X への値の割当てである。

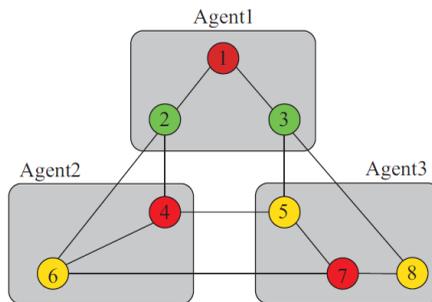


図 7.1 分散グラフ 3 彩色問題の例題

DisCSP の例として、分散グラフ 3 彩色問題の例題とその解を図 7・1 に示す。グラフ k 彩色問題は、与えられたグラフに対して、辺でつながれた 2 頂点が互いに異なる色になるようにグラフの全頂点を k 色で塗り分ける問題であり、資源配分のモデルとしてよく知られた問題である。図 7・1 の例題では、3 つのエージェントが存在し、エージェント 1 は頂点 1, 2, 3, エージェント 2 は頂点 4, 6, エージェント 3 は頂点 5, 7, 8 を所有している。また、エージェント内制約に相当する辺は辺 (1, 2), (1, 3), (4, 6), (5, 7), (7, 8) であり、エージェント間制約に相当する辺は辺 (2, 4), (2, 6), (3, 5), (3, 8), (4, 5), (6, 7) である。

3-7-2 分散制約充足問題の解法

DisCSP に対する解法は、エージェント間の局所的な通信のみを利用した分散アルゴリズムであり、非同期型と局所同期型の大きく 2 つに分けることができる。

非同期型解法では、すべてのエージェントが非同期かつ並行に変数の値を変更する。この解法では、エージェント集合が事前に階層化されており、上位エージェントが自身の変数の値を決めて下位エージェントにその値を送信する。下位エージェントは、基本的に、上位エージェントの値と矛盾しないように自身の変数の値を変更するが、そのような値がない場合には上位エージェントにバックトラックのためのメッセージを送る。代表的な非同期型解法に非同期バックトラックアルゴリズム (Asynchronous Backtracking Algorithm : ABT)³⁾ がある。ABT は、完全性を満たす最初の分散制約充足アルゴリズムであり、これが発端となって、その後、多くの非同期型解法が提案された。

一方、局所同期型解法では、すべてのエージェントが、それぞれの近傍のエージェントと同期しながら全体としては並行に変数の値を変更する。この解法では、エージェント間に上下関係はなく、すべてのエージェントは制約違反数をコストとした降下型探索を行う。また、多くの場合、局所最適を避ける何らかの手段を備えている。代表的な局所同期型解法に分散ブレイクアウトアルゴリズム (Distributed Breakout Algorithm : DBA)⁴⁾ がある。DBA は、網羅的な探索アルゴリズムでないため完全性は保証されないが、大規模な問題例に対しても一般に有効である。なお、局所同期型解法は最適化問題との相性が良く、DBA 以降に提案された多くの局所同期型解法は、DisCSP を最適化問題に拡張した分散制約最適化問題 (Distributed Constraint Optimization Problem : DCOP)²⁾ を解くものである。

■参考文献

- 1) R. Dechter : “Constraint processing.” Morgan Kaufmann Publishers, 2003.
- 2) P. J. Modi, W. M. Shen, M. Tambe and M. Yokoo : “An asynchronous complete method for distributed constraint optimization,” Proceedings of the 2nd International Joint Conference on Autonomous Agents & Multi-Agent Systems (AAMAS-03), pp.161-168, 2003.
- 3) M. Yokoo, E. H. Durfee, T. Ishida and K. Kuwabara : “Distributed constraint satisfaction for formalizing distributed problem solving,” Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems, pp.614-621, 1992.
- 4) M. Yokoo and K. Hirayama : “Distributed breakout algorithm for solving distributed constraint satisfaction problems,” Proceedings of the 2nd International Conference on Multiagent Systems (ICMAS-96), pp.401-408, 1996.

■7群-7編-3章

3-8 FA/C

(執筆者：北村泰彦) [2011年3月 受領]

FA/CとはFunctionally Accurate/Cooperationの略で、マサチューセッツ大学のVictor LesserとDaniel Corkillによって提唱された協調的問題解決の一モデルである^{1),2)}。

従来の分散システムでは、それぞれのエージェント（あるいはノード）がほかのエージェントとインタラクションしなくても部分問題を解決できるように問題を分割しておく必要があった。このような問題分割のモデルはCompletely Accurate/Nearly Autonomous (CA/NA)と呼ばれる。一方で分散センサネットワークのような問題では、処理すべきデータにノイズが多く含まれ、上記の条件を満たすように問題を適切に分割し、割り当てるのが難しい。そこで、FA/Cモデルでは以下のような方法で協調的に問題を解決する。

- ・エージェントは与えられた問題を独立に解決する。
- ・エージェントは中間的な部分解を生成する。
- ・エージェントは部分解を適当に交換し合うことで、全体的に正しい解を導き出す。

この手法では、それぞれのエージェントに存在するノイズに伴う誤った部分解は、エージェント同志の部分解交換により検出され、正しい解へと修正される。また、部分解の交換はエージェント間で非同期に行われる。したがって、エージェントは並行して問題解決を進めることが可能である。

FA/Cモデルには以下のような利点がある。

- ・低レベルのデータを交換するのではなく、中間的な部分解を交換するので、通信量が抑えられる。
- ・協調的問題解決の過程で誤りを修正する機能を持っているので、センサ、通信、エージェント自体の故障に対しても頑健で、高信頼である。
- ・エージェント間の通信は非同期に行われるので、無駄な待ち時間が少なく、自律的に処理が行われる。したがって、処理の並列性も高い。

FA/Cが背景とする問題解決のモデルは黒板モデルである³⁾。黒板モデルではデータや仮説を階層的に記憶する黒板、黒板上のデータや仮説の解釈を行い、その結果を黒板に再び書き込む知識源、知識源の動作を制御するスケジューラから構成されている。スケジューラの制御により下位のデータや仮説は知識源の処理により、より上位の仮説へと洗練されていく。解は最上位の黒板に書かれることになる。Lesserらはこのような黒板システムをネットワーク上に分散化させた分散解釈モデルを提案し、FA/Cはその協調問題解決モデルとなった。

FA/Cではエージェントの自律的かつ機会主義的な問題解決手法であるが、それぞれのエージェントでの処理が冗長になったり、不適切になったりすることもある。そこで、各エージェントの自律性を保ちつつシステムで一貫性のある処理を行う仕組みが更に必要になる。そのために、LesserとDurfeeらは以下のような改良を行った⁴⁾。

- ・組織構造の利用。システム全体の中での各エージェントの役割を明確にする。ただし、どのように役割分担するかは問題や状況に依存する。あまりに明確に役割分担すると信頼性が低下する。一方、役割の重複を増加させると冗長な処理が増える。
- ・エージェント自律性の向上。エージェントの自律性を高めると他エージェントからの影響

を受けにくくなる。しかし、これも問題や状況に応じて自律的に振る舞う方が良い場合と協調的に振る舞う方が良い場合が分かれる。

以上のように、どのように役割分担するか、どの程度の自律性をエージェントに与えるかによって問題解決の性能は異なってくる。そこで、Durfee は FA/C におけるエージェント間の協調問題解決性能を向上させる手段として PGP 法を提案した⁵⁾。PGP 法ではエージェント間で問題解決に必要な実行プランを交換する。エージェントは個別プランを交換し、それらをもとにより大局的な部分的大局プランを生成する。これに基づき協調問題解決を実行することで一貫性のとれた協調問題解決を実現しようとしている。

■参考文献

- 1) V.R. Lesser and D.D. Corkill : "Functionally Accurate, Cooperative Distributed Systems," IEEE SMC, vol.11, vol.1, pp.81-96, 1981.
- 2) V.R. Lesser : "A Retrospective View of FA/C Distributed Problem Solving," IEEE SMC, vol.21, vol.6, pp.1347-1362, 1991.
- 3) V.R. Lesser and L.D. Erman : "Distributed Interpretation: A Model and an Experiment," IEEE Trans. Comput., vol.29, vol.12, pp.1144-1163, 1980.
- 4) E.H. Durfee, V.R. Lesser, and D.D. Corkill : "Coherent Cooperation among Communicating Problem Solvers," IEEE Trans. on Comput., vol.36, vol.11, pp.1275-1291, 1987.
- 5) E.H. Durfee and V.R. Lesser : "Partial Global Planning: A Coordination Framework for Distributed Hypothesis Formation," IEEE SMC, vol.21, vol.6, pp.1167-1183, 1991.

■7 群-7 編-3 章

3-9 交 渉

■7群-7編-3章

3-10 契約ネットプロトコル

(執筆者：菅原俊治) [2010年10月 受領]

契約ネットプロトコル (Contract Net Protocol, 以下 CNP) は、マルチエージェントシステムにおいてタスクを割りあてる交渉プロトコルの一種である。本節では、当初の提案論文¹⁾をベースに基本的な CNP について説明する。

3-10-1 基本プロトコル

CNP は、公告、入札、落札の 3 つのフェーズから成る。CNP には、ほかの適切なエージェントに割り当てるべきタスクを持つエージェント (これをマネージャ (Manager) と呼ぶ) と、タスクの被割当て側となるエージェント (これを、契約者エージェントまたはコントラクタ (Contractor) と呼ぶ) の 2 種類の役割を持つエージェントを仮定する。CNP はマネージャから開始する。第一に、マネージャは、割り当てるべきタスクをエージェントに広報する (公告フェーズ (Announcement Phase))。広報を受けたエージェントはそれを参照し、自分が実行できる場合には入札を行う (入札フェーズ (Bidding Phase))。入札をしたコントラクタを入札エージェント (Bidding Agent, Potential Contractor) と呼ぶこともある。入札時には、指定された情報をマネージャに送る。マネージャは一定時間 (あるいは一定数の) 入札を待ち、各入札の情報を参照し、最適と判断される入札を選択する。選択した入札者に落札メッセージを送る (落札フェーズ (Award Phase))。落札者をコントラクタ (Contractor) あるいは落札エージェント (Awardee Agent) と呼ぶ。

3-10-2 詳細

CNP のメッセージには以下の情報が含まれる。

送受信者の ID (Sender-id, Target-id or All) : 送受信者の ID (広報では受信者は全員) を示す。

メッセージタイプ (Message Type) : タスク公告 (Task Announcement), 入札 (Bid), または落札 (Award) が選択される。

契約番号 (Contract-id) : 番号に基づいて契約を同定する。

タスクの概要 (Task Abstraction) : タスクの概要を示す。タスク名や引数などで表現する (タスクに関する知識を共有)。タスク公告のみで使用。

資格仕様 (Eligibility Specification) : タスク公告のみで使用。入札できるエージェントの条件を記述する。

入札仕様 (Bid Specification) : タスク公告のみで使用。入札の際に知らせるべき情報を指定する。この値に基づきマネージャは落札者を決める。

期限 (Expiration Time/Deadline) : タスク公告の入札期限を示す。

入札者概要 (Node Abstraction) : 入札メッセージのみに含まれ、入札者の概要を示す。ここには入札仕様で指定された情報が含まれなくてはならない。

タスク仕様 (Task Specification) : 落札メッセージに含まれ、タスクの具体的な仕様が含まれる。

図 10・1 に FIPA によるコントラクトネットプロトコルの流れを示す。

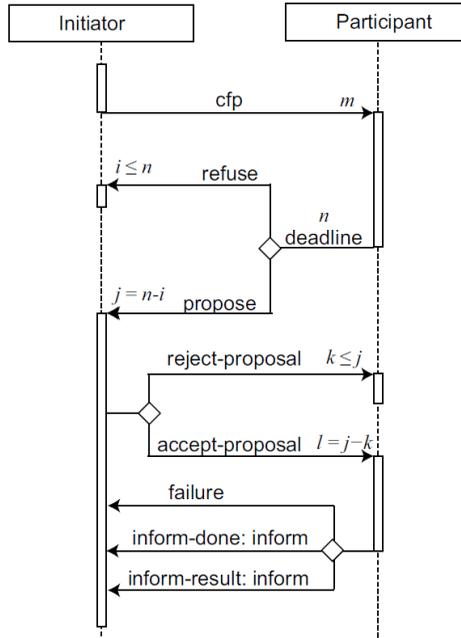


図 10・1 FIPA によるコントラクトネットプロトコル

3-10-3 特徴及び補足

CNP は、タスク共有 (Task Sharing) を仮定している。これは大きな問題の共有、つまりその一部 (サブタスク) をそれぞれが担当し、担当者全員のタスクが実行されたときに問題の解が得られるという概念である。サブタスクは更に分割される階層構造になることもあり、この場合、再び CNP が使われることもある。

CNP ではマネージャと入札者は対等と言われる。マネージャは入札に対し、自らの観点から適切な入札を選択できる。一方、入札者は、広報されたタスクを参照し、入札の是非及び入札の値を決定できる。これは相互選択 (Mutual Selection) の原理といわれる。

あらかじめマネージャあるいは入札者・契約者と決められて実装されてはいない。これらはプロトコル上の役割であり、局面ごとに変わる可能性がある。また、暗黙の役割として、(1) マネージャは、割り当てたタスクの実行を管理し、結果を集めてそれを統合する、(2) コントラクタは、落札したタスクを必ず実行する、といった必要がある。この意味で、CNP ではエージェントは協調的という仮定があり、上記の役割を実行し、入札時などにも偽りの入札はしない。

■参考文献

- 1) R.G. Smith: "The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver," IEEE Trans. on Comp., vol.C-29, no.12, pp.1104-1113, 1980.

■7 群-7 編-3 章

3-11 市場指向メカニズム

■7群-7編-3章

3-12 仲介（メディエーション）

（執筆者：峯 恒憲）[2010年10月 受領]

3-12-1 仲介の概念と仕組み

情報システムにおける仲介は、ユーザの応用プログラム（以下、ユーザプログラム）が求める情報を、データベースシステムから探し出し、必要に応じてデータや知識の不整合を是正しながら、ユーザプログラムが求める形に加工・整形して、ユーザプログラム側に提供する仕組みである。このような仲介を行うプログラムはメディエータと呼ばれ、ユーザプログラムとデータ源との独立性を保つように、両者の中間に配置される¹⁾。このメディエータには、様々なデータ源へのアクセスと、獲得したデータについての、構造や表現、意味の不整合問題や抽象化問題に対処する知的インタフェースとしての役割が期待されている。

マルチエージェントシステムの代表的アーキテクチャの一つである連邦アーキテクチャ〔7編2章2-5節参照〕では、仲介を行うエージェントはファシリテータと呼ばれ、その概念はメディエータ¹⁾に由来する。連邦アーキテクチャでは、情報システムにおけるユーザプログラムやデータベースシステムを一つのエージェントとして捉え、ファシリテータに対して、ファシリテータに動的につながるエージェント間の調整や相互作用を支援する様々なサービスを提供する役割を与えている²⁾。

メディエータやファシリテータなど、仲介を行うエージェントの重要な役割の一つに、サービスを要求するエージェント（要求者）とサービスを提供するエージェント（提供者）とのマッチングがある³⁾。これらのマッチングでは、エージェントのサービス機能（capability）と、エージェントの要求（needs）や選好（preference）についての仕様（specification）記述が利用される。マッチングからサービス提供までの手順を以下に記す。

1. エージェントは、自身のサービス機能や要求の仕様を、ファシリテータに伝える。
2. ファシリテータは、エージェントから送られてきた仕様を記録する。
3. エージェントは、あるサービスについての要求を、ファシリテータに送る。
4. ファシリテータは、要求を受けたとき、過去に知らされた、エージェントのサービス機能についての仕様記録に基づき、要求を満たすエージェントを見つける。
5. 発見したエージェントからサービス提供を受けた後、その要求に合う結果を、要求を送信してきたエージェントに送る。

3-12-2 仲介を行うエージェントの特徴

エージェント間の仲介を行うエージェントは、メディエータやファシリテータ、マッチメーカーやブローカなど、様々な呼称で呼ばれることがある⁴⁾。Deckerらは、このような仲介を行うエージェントを総称してミドルエージェントと呼んだ。そして、プライバシーの観点から、要求者の選好と提供者のサービス機能の各知識について、最初から持つことができるものの集合を、それぞれ3通りに分け、計9通りに分類したモデル（表12・1参照。なお、表内のミドルはミドルエージェントの意味）を示すとともに、そのなかの代表的なモデル（ブローカとマッチメーカー）の特徴と性能について議論した³⁾。以下に、そのブローカとマッチメーカーの特徴を

記す。

表 3・1 初期のプライバシーについての関心事により分類されたミドルエージェントの役割³⁾

選好 (preference) について最初から知っている	機能 (capability) について最初から知っている		
	提供者だけ	提供者+ミドル	提供者+ミドル+要求者
要求者だけ	(broadcaster)	“front-agent”	matchmaker/yellow-page
要求者+ミドル	anonymizer	broker	recommender
要求者+ミドル+提供者	blackboard	introducer/bodygurd	arbitrator

ブローカ (broker) は、要求者と提供者の両方のプライバシーを守りつつ、両者の要求やサービス機能についての情報を知り、両者から出される要求と応答を、両者の匿名性を守りながら、適切に処理する。ファシリテータとも呼ばれる⁴⁾。

マッチメーカ (matchmaker/yellow-pages) は、提供者から送られてきたサービス機能を保持する。要求者から出された要求を受け取ると、要求に合う提供者のリストを返す。要求者は、そのリストの中から適当な提供者を選び、直接、コンタクトをとる。マッチメーカの場合、要求者と提供者が直接コンタクトをとるようになるので、次第に互いを知ることができるようになる。

■参考文献

- 1) G. Wiederhold : “Mediators in the architecture of future information systems,” IEEE Computer, pp.38-49, 1992.
- 2) M.R. Genesereth and S.P. Ketchpel : “Software agents,” Communications of the ACM, vol.37, no.7, pp.47-54, 1994.
- 3) K. Decker, K. Sycara, and M. Williamson : “Middle-Agents for the Internet,” Proc. of IJCAI-97, 1997.
- 4) M. Klusch and K. Sycara : “Brokering and Matchmaking for Coordination of Agent Societies: A Survey,” Coordination of Internet Agents: models, technologies, and applications, Springer, pp.197-224, 2001.

■7 群-7 編-3 章

3-13 計算組織論